

УДК 677.057

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО МИКРОКЛИМАТА  
ЗОНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ СУШИЛЬНОЙ МАШИНЫ СП8-2Л**

*В.М.КАРАВАЙКОВ, И.С.СМИРНОВ*

(Костромской государственной технологической университет)

В условиях производства, где технологический процесс основан на термической обработке сырьевого материала, особое влияние на производственный микроклимат приобретает воздействие высокой температуры воздуха, его влажности и движения, а также излучения от нагретого оборудования, изделий и материалов. Совокупность этих факторов рабочей среды составляет понятие «производственный микроклимат», зависящий от сезонных колебаний метеорологических показателей внешней атмосферы и состояния санитарно-технических средств борьбы с избыточными тепловыделениями. К числу производств, на которых может возникать неблагоприятный "производственный микроклимат" относятся и производства текстильной промышленности.

В существующих методиках проектирования систем, организующих микроклимат в рабочей зоне, не производится оценка распределения температурных полей в трехмерном пространстве в зависимости от источников теплоты, их геометрического

расположения, наличия тепловых потерь в пространстве рабочей зоны. Решения по распределению температурных полей осуществляются с рядом допущений: ограничивается область исследования – чаще всего это одномерное пространство, изменение физических параметров среды в зависимости от температуры и т.д.

Отметим, что температурное поле есть совокупность значений температуры во всех точках изучаемого пространства для каждого момента времени. В общем виде нестационарное температурное поле описывается уравнением

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (1)$$

Для того, чтобы аналитически определить поля температур, скоростей и определить плотность теплового потока, необходимо располагать соответствующими уравнениями.

Дифференциальное уравнение (уравнение энергии), описывающее температурное поле в движущейся жидкости [1]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial t}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial t}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_g}{\rho c_p}. \quad (2)$$

Из дифференциального уравнения видно, что температурное поле в движущейся жидкости зависит от составляющих скорости. Чтобы сделать систему уравнений замкнутой, необходимо добавить уравнения, описывающие изменение скорости во

времени и пространстве. Такими уравнениями являются дифференциальные уравнения движения.

В общем случае трехмерного движения скоростное поле описывается тремя урав-

нениями движения – уравнениями Навье-Стокса [1]:

для оси Oх

$$\rho \frac{d\omega_x}{d\tau} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

для оси Oy

$$\rho \frac{d\omega_y}{d\tau} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

для оси Oz

$$\rho \frac{d\omega_z}{d\tau} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial z^2} \right). \quad (5)$$

Уравнения (3)...(5) получены без учета зависимости физических параметров жидкости от температуры, в частности, не учтена зависимость плотности от температуры. В то же время свободное движение жидкости определяется разностью плотностей неравномерно нагретых частиц жидкости. Поэтому дополнительно необходимо учитывать изменение массы жидкости, которая обусловлена изменением плотности жидкости, то есть необходимо добавить еще одно уравнение – уравнение неразрывности потока.

Для сжимаемых жидкостей уравнение неразрывности или сплошности потока имеет вид [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega_z)}{\partial z} = 0. \quad (6)$$

Таким образом, конвективный теплообмен в изучаемой среде описывается дифференциальными уравнениями (3)...(6), которые включают описание бесчисленного множества конкретных процессов. Чтобы выделить рассматриваемый процесс и определить его однозначно, к системе дифференциальных уравнений необходимо присоединить условия однозначности, которые дают математическое

описание всех частных особенностей рассматриваемого явления.

Проведенный нами расчет распределения температурных полей основан на методе конечных элементов, на идее аппроксимации непрерывной функции (в физической интерпретации – температуры, давления, перемещения и т.д.) дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами. Исследуемая геометрическая область разбивается на элементы таким образом, чтобы на каждом из них неизвестная функция аппроксимировалась пробной функцией (как правило, полиномом). Причем эти пробные функции должны удовлетворять граничным условиям непрерывности, совпадающим с граничными условиями, налагаемыми самой задачей. Выбор для каждого элемента аппроксимирующей функции будет определять соответствующий тип элемента.

Из-за сложности определения динамического изменения температурных полей при расчете используется пакет программ инженерных расчетов STAR-CD VERSION 3.24. Программа позволяет рассчитать и наглядно демонстрирует изменение темпе-

ратурных полей во времени под воздействием заданного источника нагрева.

На первом этапе геометрически задается область или форма исследования. После задания области тела производится задание количества элементов, на которые происходит деление тела. На следующем этапе происходит ввод граничных условий для данного случая. Граничные условия задаются для проведения анализа кинетики тепловых полей, к ним относятся место ввода или отвода тепла. Для анализа изменения тепловых полей во времени задаются временной интервал и количество расчетов. При необходимости интервал времени можно продлить и рассмотреть дальнейшее распространение теплового поля по заданной области.

Результаты расчетов представляются в виде графического цветового поля. Распределение теплового поля по заданной области отображается соответствием цвета определенной температуре. Таким образом снижение температуры по мере удаления от источника нагрева представляется в виде градиента, переходящего от воспринимаемых теплыми красно-желтых цветов до "холодных" сине-зеленых. Также возможно представление результатов расчета в графической форме.

Температурное поле рассматривается в вертикальном и горизонтальном сечениях, определяются средние колебания температур по вертикали и горизонтали.

Оценка воздействия на человека тепловых потоков в рабочей зоне производится по следующим показателям теплового состояния человека [2...4]. 1. Температура тела. 2. Средняя температура тела. 3. Изменение теплосодержания организма. 4. Индекс средней температуры тела.

1. Температура тела, °С, определяется по формуле [5]:

$$t_T = 36,61 + 0,007Q_{э,Т} / S, \quad (7)$$

где  $Q_{э,Т}$  – энергозатраты в зависимости от вида работ, Вт;  $S$  – площадь поверхности тела, м<sup>2</sup>:

$$S = 0,0167\sqrt{mh}, \quad (8)$$

где  $m$  – масса человека, кг;  $h$  – рост человека, см.

2. Средняя температура тела определяется по формуле [6]:

$$\bar{t} = \kappa t_T + \beta t_{стк}, \quad (9)$$

где  $t_{стк}$  – средневзвешенная температура "оболочки", °С, для комфортных теплоощущений:

$$t_{стк} = 36,07 - 0,0354Q_{э,Т} / S, \quad (10)$$

где  $\kappa$  и  $\beta$  – коэффициенты смешивания для температуры тела "ядра" и "оболочки", связанные следующим образом:

$$\kappa + \beta = 1. \quad (11)$$

Соотношения этих коэффициентов для различных условий теплообмена приведены в [6].

3. Изменение теплосодержания организма:

$$\pm Q_T = \pm Q_{Т,П} - Q_{исп} - Q_{п}, \text{ Вт} \quad (12)$$

где  $\pm Q_{Т,П}$  – отдача теплоты (тепловой поток) со всей поверхности тела, Вт:

$$Q_{Т,П} = 0,75Sq, \text{ Вт}, \quad (13)$$

где 0,75 – коэффициент, характеризующий долю поверхности тела, участвующую в теплообмене;  $S$  – поверхность тела, м<sup>2</sup>;  $q$  – средневзвешенная величина плотности тепловых потоков с поверхности тела человека, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = \alpha(t_{п,тела} - t_{окр,ср}), \quad (14)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности тела к окружающей среде, Вт/(м<sup>2</sup>·К). По результатам расчета коэффициента теплоотдачи при помощи теории подобия получено значение

$$\alpha = 8,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К},$$

$t_{\text{п.тела}}$  – температура поверхности тела, °С.

При фактических измерениях определяется средняя температура поверхности тела по результатам приборного обследования, при расчетном методе принимается равной  $t_{\text{п.тела}} = 36,6^\circ\text{С}$ .

$t_{\text{окр.ср}}$  – температура окружающей среды, °С:

$$Q_{\text{исп}} = 0,675 \Delta m, \quad (15)$$

где  $Q_{\text{исп}}$  – величина теплоотдачи испарением, Вт; 0,675 – скрытая теплота парообразования, Вт·ч/кг;  $\Delta m$  – количество испарившейся влаги, кг/ч, (количество испарившейся влаги в зависимости от средней температуры тела определяется из справочных данных [6]):

$$Q_{\text{в}} = c_{\text{в}} v (t_{\text{т}} - t_{\text{окр.с}}) \cdot 3600, \quad (16)$$

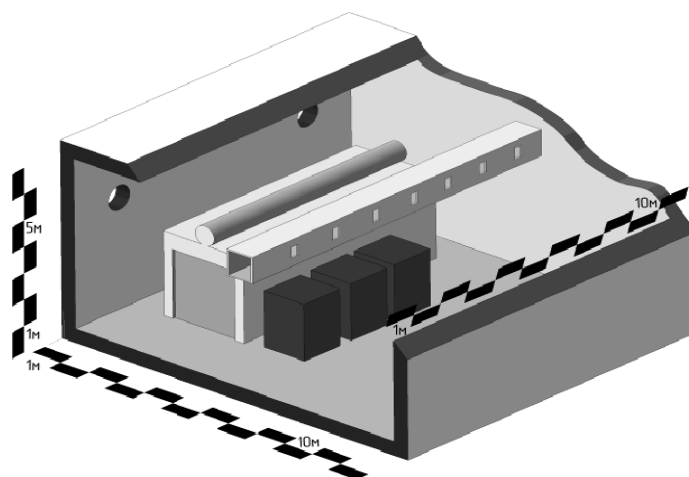


Рис. 1

2. Производим вычитание из общего объема помещения объемы технологического оборудования, систем приточно-вытяжной вентиляции. Определяем расчетную область температурного поля.

3. Задаем граничные условия – температуры на поверхностях технологического оборудования, температуры и скорости воздуха в приточно-вытяжных системах вентиляции, определенные экспериментально.

4. Осуществляем построение геометри-

где  $Q_{\text{в}}$  – отдача теплоты на нагрев вдыхаемого воздуха, Вт;  $c_{\text{в}}$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж/м<sup>3</sup>К;  $V$  – объем легкой вентиляции, приведенный к стандартным условиям, м<sup>3</sup>.

4. Индекс средней температуры тела:

$$\bar{t} = 0,0173(\bar{t} - 26,1)^{2,5} - 6,0. \quad (17)$$

По результатам экспериментальных исследований, проведенных на ООО "Льно-объединение им. И.Д. Зворыкина" были определены средние температуры поверхностей технологического оборудования и параметры воздуха приточной вентиляции.

Исследования теплового режима проводим в следующей последовательности.

1. Строим геометрическую модель для исследования температурных полей рабочей зоны обслуживания сушильных установок СП8-2Л для сушки пряжи с соблюдением масштаба (рис.1).

ческой сетки для дальнейшего расчета основных систем уравнений в узловых точках рассматриваемого объема.

5. Производим расчет температурного поля и поля скоростей воздуха при условиях открытия створок сушильной установки для выгрузки высушенной пряжи и фактических температур на поверхностях машины.

Изменение температуры определяем в вертикальном и горизонтальном сечениях (рис.2 и 3).

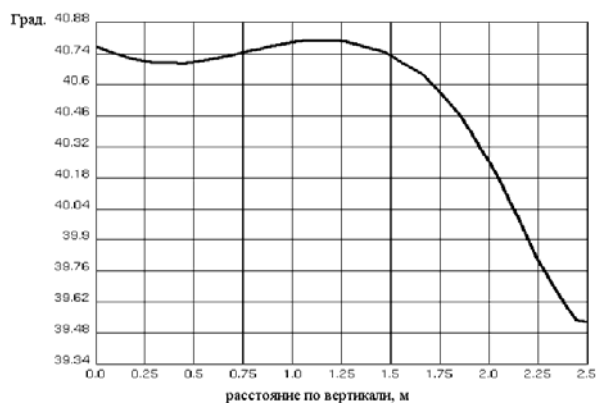


Рис. 2

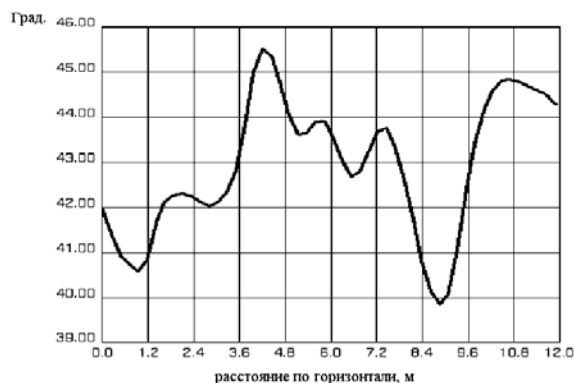


Рис. 3

Согласно ГОСТу 12.1.005–88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны колебания температуры воздуха по горизонтали в рабочей зоне, а также в течение смены допускаются до 4°C (при легких работах) и до 6°C (при тяжелых работах).

Из анализа графиков температур (рис.2 и 3) следует:

1) температура воздуха в рабочей зоне сушилки СП8-2Л выше допускаемой нормативами;

2) колебания температуры воздуха как по вертикальной, так и по горизонтальной поверхностям превышают нормативно установленные значения.

По формулам (7)...(17) рассчитаем показатели теплового состояния организма человека, работающего в данных условиях (табл. 1 – результаты расчета параметров теплового состояния).

Т а б л и ц а 1

Температура тела, °С	Средняя температура тела, °С	Изменения теплосодержания, кДж	Индекс средней температуры
37,92	37,6	273,04	0,77

По результатам расчета можно сделать вывод о тепловом состоянии организма человека, которое показывает, что организм находится в условиях перегрева.

Для создания условий оптимального теплового равновесия необходимо выполнить ряд организационно-технических мероприятий.

1. Изолировать тепловые поверхности для достижения нормативных температур на поверхностях технологического оборудования. Температура на поверхности не должна превышать 45°C.

2. В местах выгрузки и загрузки организовать вытяжную вентиляцию для удаления избытков тепла.

После выполнения указанных мероприятий были рассчитаны параметры микроклимата и построены графики изменения температуры воздуха рабочей зоны по горизонтали в продольном сечении (рис.4) и по вертикали в продольном сечении (рис.5), которые показали эффективность указанных энергосберегающих мероприятий: температура в рабочей зоне снизилась до 22°C.

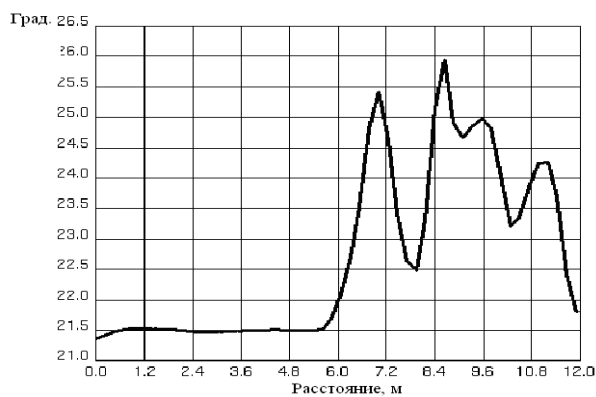


Рис. 4

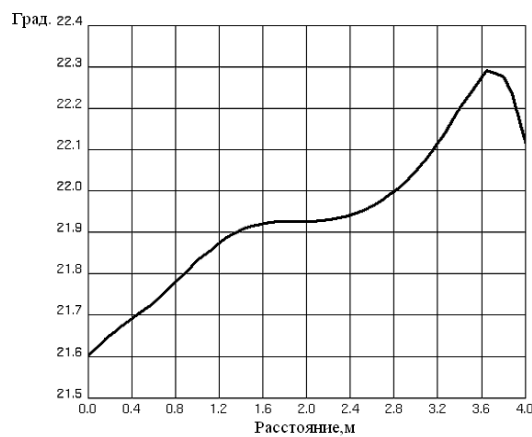


Рис. 5

Колебания температуры рабочей зоны в вертикальной плоскости составляют от 21,6 до 22°C; в горизонтальной плоскости – от 21,5 до 25°C, что соответствует нормированным колебаниям температуры в соответствии с ГОСТом 12.1.005–88. Подвижность воздуха также отвечает требованиям ГОСТа 12.1.005–88 и составляет от 0,152 до 0,4 м/с.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена новая методика мониторинга и проектирования производственного микроклимата в зоне обслуживания теплопотребляющего оборудования на основе моделирования пространственного нестационарного температурного поля и с учетом показателей теплового состояния человека.

2. Приведен пример организации производственного микроклимата в зоне обслуживания установки для сушки пряжи в паковках СП8-2Л.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. – 4-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
2. Воздействия на организм человека опасных и вредных экологических факторов. Метрологические аспекты. В 2-х томах. Под ред. Исаева Л.К. Том II. – М.: ПАИМС, 1997.
3. Гигиенические критерии оценки условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса. Утверждены Госкомсанэпиднадзором России 12.07.94, Р2.2.013-94.
4. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: Санитарные правила и нормы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997.
5. Салазкин В.И., Малкиман И.И., Заратуйченко И.К., Карпов В.В. Критерий классификации теплового состояния человека / В. кн.: Физиология экстремальных состояний и индивидуальная защита человека – М., 1982. С.163...164.
6. Скляников В.П., Афанасьева Р.Ф., Машикова Е.Н. Гигиеническая оценка материалов для одежды. – М.: Легпромбытиздат, 1985.

Рекомендована кафедрой технологии производства льняного волокна. Поступила 16.06.07.